

Dry Metal Forming Open Access Journal

Fast Manuscript Track

Edited by Frank Vollertsen
Available online at elib.suub.uni-bremen.de



www.drymetalforming.de

Dry Met. Forming OAJ FMT 2 (2016) 050–055
Received 15 April 2016; published 09 May 2016

Lokale Beeinflussung der Oberflächenrauheit von Silizium dotiertem CVD-Diamant durch funkenerosive Mikrobearbeitung

Ralf Kühn^{*1}, Markus Prieske², Henning Zeidler¹, Andreas Schubert¹, Frank Vollertsen^{2,3}

¹Professur Mikrofertigungstechnik der Technischen Universität Chemnitz, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Deutschland

²BIAS - Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH, Klagenfurter Str. 2, D-28359 Bremen, Deutschland

³Universität Bremen, Bibliothekstr. 1, D-28359 Bremen, Germany

Abstract

CVD-Diamantschichten besitzen ein hohes Potential für den Einsatz als verschleißfeste Oberflächenbeschichtungen für Umformwerkzeuge. Zur Vermeidung von Beschädigungen am Werkstück im Umformprozess sind geringe Oberflächenrauheiten gefordert. Polykristalline CVD-Diamantschichten bestehen aus einzelnen Diamantkristallen, welche im Beschichtungsprozess zusammenwachsen. Die einzelnen Diamantkristalle führen dabei zu einer erhöhten Oberflächenrauheit, sodass eine Nachbearbeitung zum Glätten dieser ultraharten Schichten notwendig wird. Eine Herausforderung stellt insbesondere die lokale Veränderung der Oberfläche dar, welche zur Funktionalisierung dieser Schichten beitragen kann. Ein geeignetes Verfahren zur lokalen Beeinflussung stellt die Mikrofunkenerosion (Mikro-EDM) dar, welche als kontaktfreies Fertigungsverfahren, unabhängig von den mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes, eine Bearbeitung ermöglicht. Eine wichtige Einschränkung stellt die erforderliche elektrische Mindestleitfähigkeit von $0,01 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ dar, weshalb das Verfahren ausschließlich für dotierte CVD-Diamantschichten einsetzbar ist.

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird eine Möglichkeit vorgestellt, die Oberflächenrauheit einer mit Silizium dotierten CVD-Diamantschicht durch Mikro-EDM lokal zu beeinflussen. Dazu wurde durch Bahnerosion mit einer Stabelektrode ($\varnothing 90 \mu\text{m}$) ein Feld mit den Abmessungen von $500 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ bearbeitet. Anschließend wurde die Oberfläche qualitativ und quantitativ durch Laserscanning-Mikroskopie analysiert. Die Oberflächenrauheit S_a konnte von $1,43 \mu\text{m}$ auf $0,83 \mu\text{m}$ reduziert, sowie die reduzierte Spitzenhöhe Sp_k um 78% verringert werden.

Keywords: dotierter CVD-Diamant, Mikro-EDM, Oberflächenrauheit

1 Einleitung

Chemische Gasphasenabscheidung (CVD)-Diamantschichten bieten ein hohes Potential für den Einsatz als Beschichtungen für hochbelastete Werkzeuge im Maschinenbau, wie beispielsweise für Schneidwerkzeuge [1] oder für Ziehwerkzeuge [2]. Diese polykristallinen CVD-Diamantschichten bestehen aus einzelnen Diamantkristallen. Während der CVD Diamantsynthese, wachsen die einzelnen Diamantkristalle radial in alle Richtungen. Abhängig von der Bekeimungsdichte wird nach einer gewissen Abscheidungsdauer eine geschlossene Diamantschicht erreicht. Prozessbedingt entsteht dabei eine raue Oberfläche, die, insbesondere im Hinblick auf den Einsatz als potentielle Beschichtungen für Umformwerkzeuge, eine Nachbearbeitung erfordert. Aufgrund der exzellenten mechanischen Eigenschaften von CVD-Diamant sind spanende Verfahren nur bedingt für

eine lokale Beeinflussung der Oberflächenrauheit einsetzbar. Eine potentielle Alternative stellen abtragende Fertigungsverfahren, wie beispielsweise die Funkenerosion, dar. Diese benötigen keinen mechanischen Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück, wodurch die mechanischen Eigenschaften des zu bearbeitenden Werkstoffes keinen Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis besitzen.

Reiner CVD-Diamant ist als elektrischer Isolator für die auf elektrischen Entladungen basierende Funkenerosion ungeeignet. Daher ist es erforderlich diesen für die Anwendbarkeit dieses Verfahrens zu dotieren. Neben der am weitesten verbreiteten Dotierung mit Bor [3] ist es auch möglich diesen mit Silizium, Aluminium oder Titan zu dotieren [4]. Für bor-dotierte CVD-Diamantschichten wurden bereits Untersuchungen zu erreichbaren Oberflächenrauheiten bei der funkenerosiven Bearbeitung durchgeführt. Lu et al. [5] erzielten dabei Rauheiten von

$R_a < 0,5 \mu\text{m}$, während Olsen et al. [6] für das Draht-EDM Werte zwischen $0,7$ und $2,0 \mu\text{m}$ für R_a berichteten.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die potentielle Anwendbarkeit der Mikrofunkenerosion zur lokalen Beeinflussung der Oberflächenrauheit von Silizium dotiertem CVD-Diamant experimentell untersucht. Dazu wurde ein definierter Bereich der CVD-Diamantschicht funkenerosiv bearbeitet und die resultierende Oberflächenrauheit mit der unbearbeiteten Oberfläche qualitativ und quantitativ verglichen.

2 Funkenerosion

Die Funkenerosion (Electrical discharge machining – EDM) ist ein thermisches Fertigungsverfahren, bei dem der Materialabtrag durch elektrische Entladungen zwischen zwei Elektroden hervorgerufen wird. Das Verfahrensprinzip dazu ist in Abbildung 1 dargestellt.

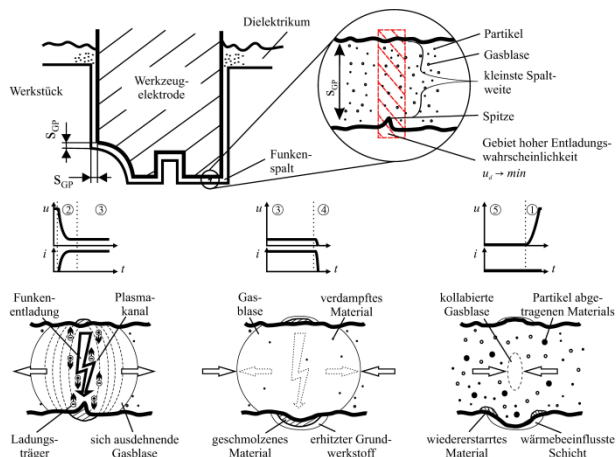


Abb. 1: Schematische Darstellung des Verfahrensprinzips beim EDM [7]

Werkzeug- und Werkstückelektrode sind durch ein elektrisch nicht leitfähiges Medium getrennt, das Dielektrikum. Durch das Anlegen einer Spannung zwischen beiden Elektroden, erfolgt nach dem Überschreiten der Durchschlagsfestigkeit des Dielektrikums eine elektrische Funkenentladung. Dabei entsteht ein leitfähiger Plasmakanal, der einen Stromfluss zwischen beiden Elektroden hervorruft. Durch die lokale Begrenzung des Plasmakanals entstehen dabei Temperaturen bis zu 10000 K , wodurch kleinere Materialvolumina an beiden Elektroden aufgeschmolzen bzw. verdampft werden. Nach Zusammenbrechen des Plasmakanals durch Abschalten der Spannung implodiert die entstandene Gasblase und das aufgeschmolzene Material wird aus dem Bearbeitungsbereich ausgeschleudert. Durch eine stetige Spülung des Dielektrikums, werden die Abtragpartikel aus dem Bearbeitungsbereich abtransportiert, wodurch dieser deionisiert wird. Die Durchschlagfestigkeit im Arbeitsspalt ist abhängig vom Arbeitsabstand zwischen den Elektroden, den Eigenschaften des verwendeten Dielektrikums sowie evtl. vorhandenen Partikeln, welche die elektrische Leitfähigkeit lokal verringern.

Durch eine stetige Realisierung von mehreren zehntausend Entladungen und lokalen Aufschmelzungen pro Sekunde wird die Werkzeugelektrode im Werkstück abgebildet.

Vorteile der EDM-Bearbeitung ist deren Unabhängigkeit von den mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs wie beispielsweise Härte, Festigkeit und Zähigkeit. Die kontaktfreie Bearbeitung ermöglicht darüber hinaus ein nahezu kraftfreies Abtragen des Materials.

Das EDM-Verfahren wird durch die erforderliche elektrische Mindestleitfähigkeit von $0,01 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ [8] begrenzt, weshalb das bearbeitbare Materialspektrum eingeschränkt wird. Eine besondere Herausforderung stellt insbesondere der prozessbedingte Verschleiß an der Werkzeugelektrode dar, welcher einen wesentlichen Einfluss auf die Präzision des Prozesses besitzt. Darüber hinaus führt der thermische Charakter des EDM zu Randzonenbeeinflussungen des Werkstücks.

Entsprechend der wirksamen Abtragsmechanismen bildet sich beim EDM eine kraterförmige Oberflächenstruktur aus. Die Abmessungen der Krater sind dabei abhängig von der gewählten Entladeenergie. Im Bereich der Mikro-EDM Bearbeitung werden typischerweise Entladeenergien unter $100 \mu\text{J}$ bei Pulsdauern unter $1 \mu\text{s}$ verwendet.

3 Experiment

3.1 Experimentelles Setup

Die experimentellen Untersuchungen wurden an einer Sarix SX-100 Mikro-EDM Anlage durchgeführt. Abbildung 2 zeigt ein Foto des verwendeten Versuchsaufbaus. Für die Experimente zum Glätten der dotierten CVD-Diamantschicht wurde eine Spannung von 130 V und ein Energielevel CF100 verwendet, was einer Entladeenergie von ca. $4,5 \mu\text{J}$ entspricht. Die Versuche wurden mit negativer Werkzeuggpolarität durchgeführt, so wie es in der Mikro-EDM Bearbeitung üblich ist. Während der Bearbeitung wurde eine konstante Rotation der Werkzeugelektrode bei 600 U/min eingestellt.

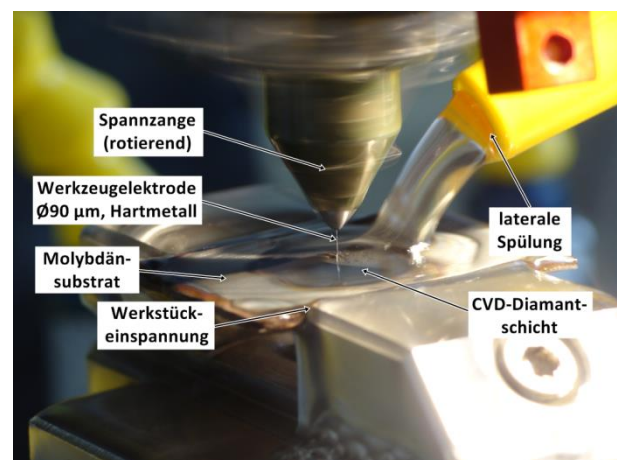


Abb. 2: Foto des verwendeten Versuchsaufbaus

Die Experimente wurden mit einer Stabelektrode aus Hartmetall mit einem Durchmesser von $90 \mu\text{m}$ durchgeführt. Als Dielektrikum wurde das Erodieröl HEDMA 111 der Fa. Letra AG verwendet. Die Spülung erfolgte

lateral durch eine Düse. Die Anlage erlaubt eine mehrachsige Bewegung der Werkzeugelektrode, wodurch auch komplexe Bewegungen realisiert werden können. Als Werkstück dient ein Molybdänsubstrat, auf der eine mit Silizium dotierte CVD-Diamantschicht abgeschieden wurde. Die Beschichtung, welche in [9] näher beschrieben wird, erfolgte mittels eines laserbasierten Plasma CVD-Prozesses. Die im Rahmen der Experimente bearbeitete Si-dotierte CVD-Diamantschicht wurde mit einer Prozessdauer von 60 min abgeschieden, wodurch sich eine Schichtdicke von $15\text{ }\mu\text{m} - 20\text{ }\mu\text{m}$ ergibt.

3.2 Bearbeitungsstrategie für ebene Substratgeometrie

Ziel der Experimente war es, die Oberfläche der Si-dotierten CVD-Diamantschicht lokal in ihrer Oberflächenrauheit zu beeinflussen. Um mit der Stabelektrode einen größeren Bereich bearbeiten zu können, wurde eine gezielte Verfahrensbewegung konzipiert. Abbildung 3 zeigt eine prinzipielle Darstellung der angewandten Verfahrenstrategie.

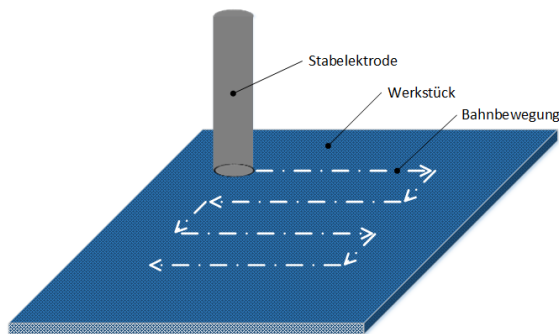


Abb. 3: Prinzipdarstellung der Verfahrenstrategie zum Glätten von dotiertem CVD-Diamant durch Mikro-EDM

Die Bewegung der Stabelektrode erfolgte in einer parallelen Anordnung der Bahnen, $400\text{ }\mu\text{m}$ in x-Richtung sowie $150\text{ }\mu\text{m}$ in y-Richtung bei Schritten von $50\text{ }\mu\text{m}$. Ausgehend vom Elektrodendurchmesser von $90\text{ }\mu\text{m}$ ergibt dies eine Bahnüberdeckung von ca. 45 %. Insgesamt ergibt sich daraus eine Fläche von $500\text{ }\mu\text{m} \times 250\text{ }\mu\text{m}$, welche dadurch bearbeitet werden sollte. Die Zustellung in z-Richtung erfolgte dabei pro Ebene in Schritten von $2\text{ }\mu\text{m}$ auf eine maximale Zustelltiefe von $8\text{ }\mu\text{m}$. Der Start der Bearbeitung erfolgte nach einem Antasten der Oberfläche bei einem Arbeitsabstand von ca. $3\text{ }\mu\text{m}$ zur Probenoberfläche.

3.3 Oberflächencharakterisierung

Zur Charakterisierung von Oberflächen steht eine Vielzahl an Parametern zur Verfügung, welche in DIN EN ISO 25178 Teil 2 definiert sind. Für die Bewertung der bearbeiteten Si-dotierten CVD-Diamantschicht wurden vier relevante Rauheitsparameter ausgewählt. Der arithmetische Mittenrauwert S_a , die Kernrautiefe S_k , die reduzierte Spitzenhöhe S_{pk} und die reduzierte Riefentiefe S_{vk} . Abbildung 4 zeigt eine schematische Darstellung der funktionalen Rauheitsparameter S_k , S_{vk} und S_{pk} .

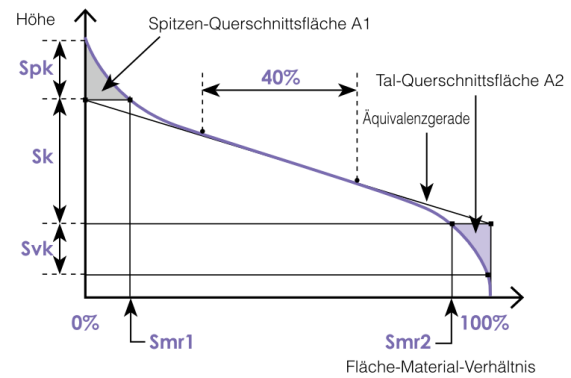


Abb. 4: Schematische Darstellung funktionaler Rauheitsparameter [10]

Der Oberflächenparameter Kernrautiefe S_k beschreibt dabei die Tiefe des Rauheitsprofils unter Ausschluss herausragender Spitzen und tiefer Riefen [11]. Die reduzierte Spitzenhöhe S_{pk} und die reduzierte Riefentiefe S_{vk} beschreiben die gemittelte Höhe der aus dem Kernbereich herausragenden Spitzen bzw. Riefen.

3.4 Unbearbeiteter Zustand

Vor der Durchführung der Experimente wurde die unbearbeitete Oberfläche der Si-dotierten CVD-Diamantschicht analysiert und bewertet. Die Messung der Oberflächenrauheit bzw. die optischen Aufnahmen erfolgten unter Verwendung eines Keyence VK-9700 Laserscanning Mikroskops. Als Messfeldgröße zur Bestimmung der Rauheitsparameter wurde jeweils ein Bereich von $200 \times 200\text{ }\mu\text{m}$ verwendet. Zur statistischen Absicherung der Werte wurden die Messungen an vier unterschiedlichen Messpositionen durchgeführt und der Mittelwert ermittelt.

Abbildung 5 zeigt eine optische Aufnahme sowie einen horizontalen Profilschnitt der unbearbeiteten Si-dotierten CVD-Diamantschicht.

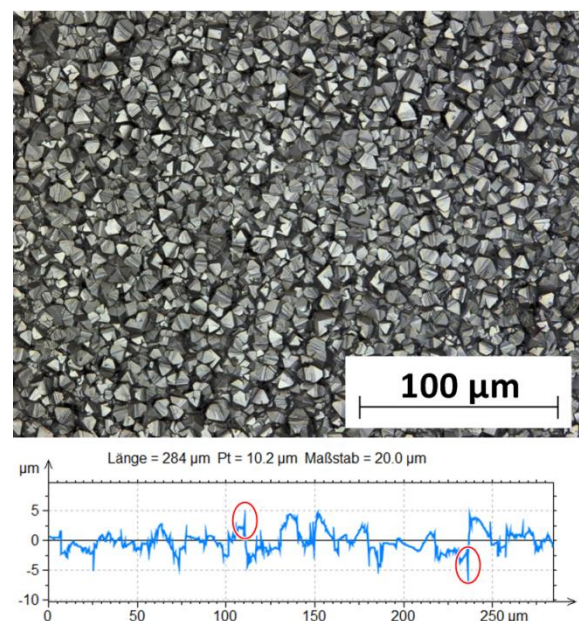


Abb. 5: Optische Aufnahme sowie horizontaler Profilschnitt der unbearbeiteten Si-dotierten CVD-Diamantschicht

Auf der optischen Aufnahme ist eine Vielzahl an Diamantkristallen zu erkennen, die sich in ihrer äußeren Form und Größe voneinander unterscheiden. Es liegt keine geordnete Struktur, sondern vielmehr eine stochastische Verteilung vor. Der Profilschnitt zeigt den scharfkantigen Verlauf der Oberfläche auf. Die in Abbildung 5 rot beispielhaft markierten Artefakte im Profilschnitt sind auf die scharfen Kanten der Diamantkristalle zurückzuführen, welche zu einem Untersteuern des Abtastsignals des verwendeten Lasers führen. Abbildung 6 zeigt eine REM-Aufnahme der Oberfläche der unbearbeiteten Si-dotierten CVD-Diamantschicht.

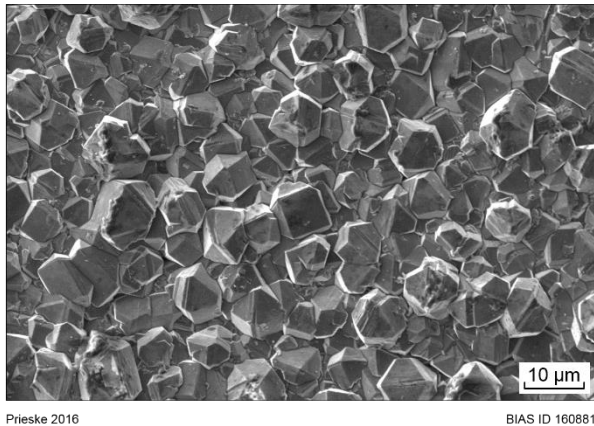


Abb. 6: REM-Aufnahme einer unbearbeiteten Si-dotierten CVD-Diamantschicht

Die scharfkantigen Spitzen der einzelnen Diamanten stellen insbesondere für den Einsatz für Umformwerkzeuge ein Problem dar, da diese in dieser Form zu Beschädigungen am Werkstück führen würden. Daraus leitet sich insbesondere der Bedarf nach der Möglichkeit einer lokalen Beeinflussung der Oberflächenrauheit dieser CVD-Diamantschichten ab.

Die Ermittlung der Rauheitsparameter erfolgte nach ISO25178. Als Werte für die verwendeten Filter wurde für den S-Filter 1 µm und für den L-Filter 0,1 mm verwendet. Die ermittelten Werte für die Rauheitsparameter sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: Ermittelte Rauheitsparameter für die unbearbeitete Si-dotierte CVD-Diamantschicht

Parameter	Sa	Sk	Spk	Svk
Mittelwert	1,43 µm	4,59 µm	1,97 µm	1,29 µm
Standardabweichung	0,14 µm	0,45 µm	0,32 µm	0,08 µm

Für Sa wurde ein Wert von 1,43 µm und für Sk ein Wert von 4,59 µm ermittelt. Auffallend sind, mit Ausnahme für Svk, insbesondere die hohen Standardabweichungen im Bereich von 10 % bis 16 %, die darauf hindeuten, dass die unbearbeitete Oberfläche schwankend in ihrer Oberflächenfeingestalt ist. Der Spk Wert von 1,97 µm deutet auf einen hohen Anteil von herausstehenden Spitzen hin, wie bereits anhand der REM-Aufnahme erkennbar war.

4 Ergebnisse

Abbildung 7 zeigt die optische Aufnahme der Oberfläche nach der Bearbeitung.

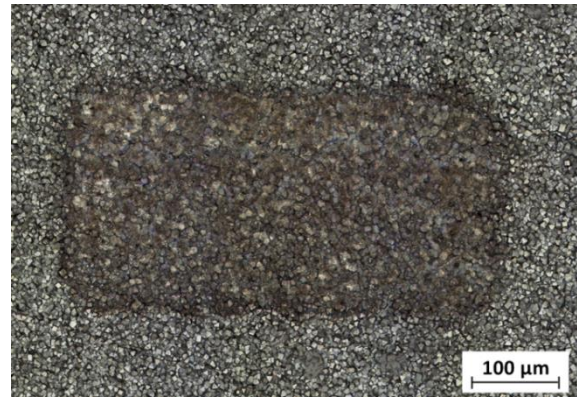


Abb. 7: Optische Aufnahme der Oberfläche der bearbeiteten Si-dotierten CVD-Diamantschicht

Der bearbeitete Bereich hebt sich deutlich vom unbearbeiteten Bereich ab. Die Abmessungen des Feldes liegen im Bereich von 500 µm x 250 µm. Die vorherige eindeutige Erkennbarkeit der einzelnen Diamantkristallen ist im bearbeiteten Bereich nicht mehr gegeben. Dies wird auch in der vergrößerten Aufnahme der bearbeiteten Oberfläche in Abbildung 8 deutlich. Der Profilschnitt in Abbildung 8 zeigt im Gegensatz zu Abbildung 5 nur wenige bis keine herausstehenden Spitzen. Darüber hinaus sind im Profil deutlich weniger Artefakte erkennbar. Dies deutet auf ein Abtragen der herausstehenden Diamantkristalle hin, was einem Einglätten der Oberfläche entsprechen würde.

Analog zum unbearbeiteten Si-dotierten CVD-Diamant wurden auch im Bereich der EDM-Bearbeitung die Rauheitsparameter bestimmt. Aufgrund der Eingrenzung der zur Verfügung stehenden Fläche, wurde der Mittelwert hierbei aus drei anstelle von vier Messstellen ermittelt. Die Ergebnisse dazu sind in Tabelle 2 aufgelistet.

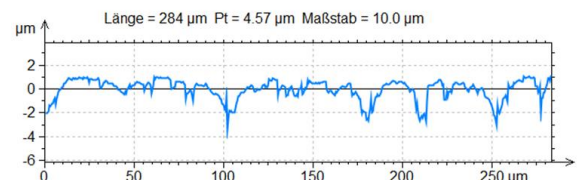
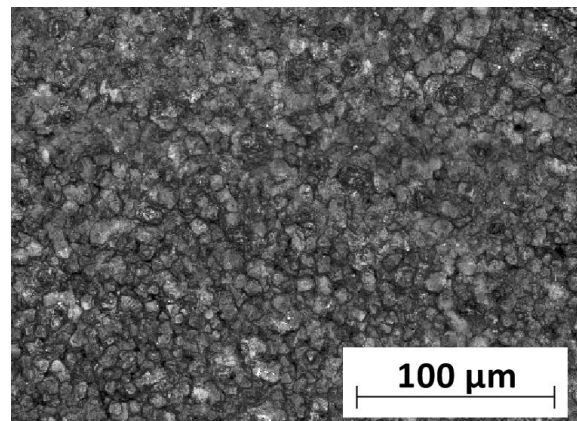


Abb. 8: Optische Aufnahme sowie horizontaler Profilschnitt der geätzten Si-dotierten CVD-Diamantschicht

Tab. 2: Ermittelte Rauheitsparameter für die bearbeitete Si-dotierte CVD-Diamantschicht

Parameter	Sa	Sk	Spk	Svk
Mittelwert	0,83 μm	1,97 μm	0,46 μm	2,25 μm
Standardabweichung	0,04 μm	0,06 μm	0,02 μm	0,24 μm

Verglichen mit der unbearbeiteten Oberfläche zeigen sich deutlich veränderte Werte für die Rauheitsparameter. Sa konnte von 1,43 μm auf 0,83 μm verringert werden. Auch für Sk und Spk konnten starke Verringerungen der Werte nachgewiesen werden. Anhand der Werte wird deutlich, dass die Mikro-EDM Bearbeitung zu einer Verringerung der Oberflächenrauheit und zu einer Verringerung des Anteils der Spitzen führt. Im Gegensatz dazu zeigt sich für Svk, also des Anteils der Riefen bzw. Täler, ein Anstieg des Wertes von 1,29 μm auf 2,25 μm . Dies ist insbesondere auf einzelne lochartige Strukturen zurückzuführen, welche während der Bearbeitung entstanden sind. Dies wird am Falschfarbenbild der bearbeiteten Oberfläche in Abbildung 9 deutlich.

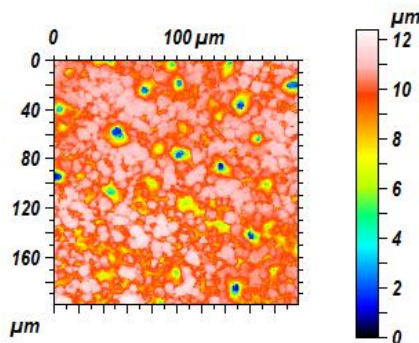


Abb. 9: Falschfarbenbild der geglätteten Si-dotierten CVD-Diamantschicht

Die einzelnen Löcher mit einem Durchmesser von maximal 18 μm bei maximalen Tiefen von ca. 8 μm sind eindeutig erkennbar. Diese beeinflussen insbesondere den Sa-Wert, sodass davon ausgegangen werden kann, dass eine Vermeidung dieser Löcher gleichzeitig zu einer weiteren Verringerung der Rauheitsparameter führen dürfte.

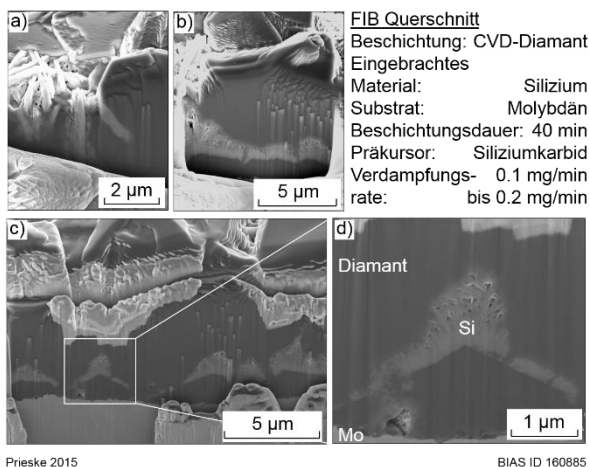
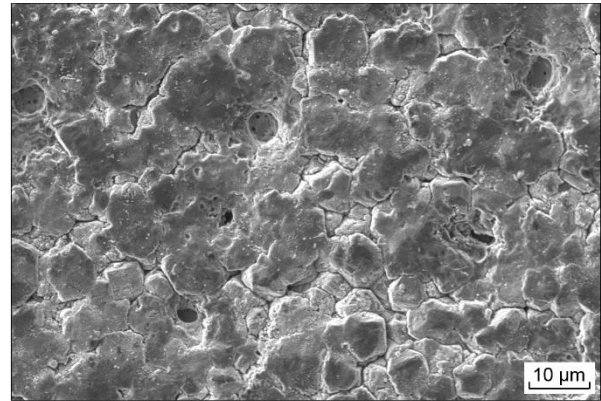


Abb. 10: Fokussierter Ionenstrahl (FIB) Schnitt an einer polykristallinen Diamantschicht mit eingebrachtem Silizium. a) Die Siliziumcluster ragen in die Diamantkristalle hinein, b) befinden sich darunter und c), d) dazwischen [9].

Die Löcher sind vermutlich auf Siliziumcluster zurückzuführen, die überall innerhalb der Diamantschicht auftreten, wie in Abbildung 10 zu sehen ist und in [9] beschrieben wurde.

Beim Vergleich zwischen den Rasterelektronenaufnahmen in Abb. 6 und Abb. 11 ist eine deutliche Glättung der scharfen Diamantkristallkante zu sehen.

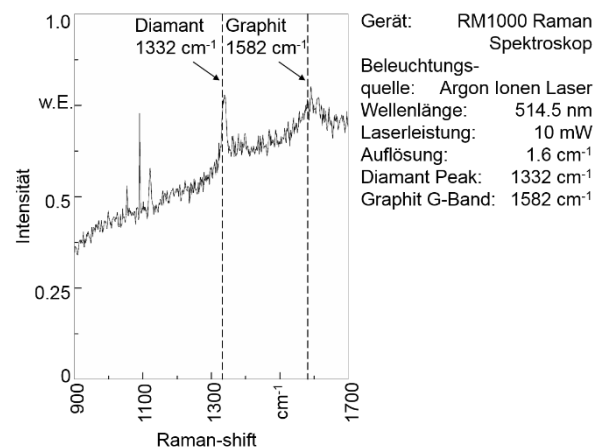


Prieske 2016

BIAS ID 160882

Abb. 11: REM-Aufnahme der mittels EDM nachbearbeiteten Si-dotierten Diamantoberfläche.

Mittels eines Raman Spektrums (vgl. Abb. 12) konnte anhand des Peaks bei einer Ramanverschiebung von 1332 cm^{-1} bewiesen werden, dass auch nach der EDM Bearbeitung der Diamantschicht immer noch eine Diamantkristallstruktur vorliegt. Der breite Peak bei 1582 cm^{-1} ist das G-Band, welches auf das Vorliegen von Graphit hindeutet [12].



Prieske 2016

BIAS ID 160883

Abb. 12: Raman-Spektrum an der EDM geglätteten Si-dotierten Diamantschicht.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Untersuchungen war, die Oberflächenrauheit von Silizium dotiertem CVD-Diamant durch Mikro-EDM lokal zu verringern. Die Ergebnisse zeigen, dass das Verfahren Mikro-EDM prinzipiell dafür geeignet ist. Die Realisierung der lokalen Beeinflussung der Oberflächenrauheit erfolgte durch Bahnerosion unter Verwendung einer Stabelektrode mit einem Durchmesser von 90 μm und einer Entladeenergie von 4,6 μJ , bei der ein Feld mit den Abmessungen 500 μm x 250 μm bearbeitet wurde. Die Analyse ausgewählter Rauheitsparameter

zeigte eine erhebliche Verringerung der Oberflächenparameter S_a , S_k und S_{pk} . Insbesondere die Verringerung der reduzierten Spitzenhöhe S_{pk} um 78 % zeigt, dass ein Einglätten der herausstehenden Diamanten prinzipiell möglich ist. Demgegenüber führte die Mikro-EDM Bearbeitung zu einer Vergrößerung der reduzierten Riefentiefe S_{vk} um ca. 74 %. Dies ist auf einzelne lochartige Strukturen zurückzuführen, welche durch einen lokal verstärkten Abtrag entstehen und diesen Parameter maßgeblich beeinflussen. Als Ursache kommen einerseits vorliegende Siliziumcluster innerhalb der CVD-Diamantschicht, welche durch die Mikro-EDM Bearbeitung schneller abgetragen werden, oder andererseits prozessbedingte Ursachen wie Fehlentladungen wie beispielsweise Lichtbögen in Frage.

Weitere Untersuchungen werden sich mit einer Variation der eingesetzten Entladeenergie beschäftigen, bei der insbesondere eine weitere Reduzierung der erzielbaren Oberflächenrauheit im Fokus der Experimente steht. Weiterhin soll die Entstehung der lochartigen Strukturen charakterisiert werden, um diese möglichst vermeiden zu können. Im Hinblick auf die Bearbeitung von komplexen Substratgeometrien ist darüber hinaus die Entwicklung weiterer Verfahrenstrategien notwendig, mit der auch komplizierte Oberflächenformen lokal in ihrer Rauheit beeinflusst werden können.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung des Vorhabens „Schmierstofffreies Tiefziehen von Aluminiumblechen für den Karosseriebau“ im Rahmen der Förderkennzeichen SCHU 1484/16-2 und VO 530/75-2 des Schwerpunktprogrammes 1676.

References

- [1] P.U. Arumugam, A.P. Malshe, S.A. Batzer: Dry machining of aluminum–silicon alloy using polished CVD diamond-coated cutting tools inserts. *Surf. Coat. Technol.* 200 (2006) 3399–3403.
- [2] Z.M. Zhang, H.S. Shen, F.H. Sun, X.C. He, Y.Z. Wan: Fabrication and application of chemical vapor deposition diamond-coated drawing dies. *Diam. Relat. Mater.* 10 (2001) 33–38
- [3] A. Kraft: Doped Diamond: A Compact Review on a New, Versatile Electrode Material - Open Access Library. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2 (2007) 355–385
- [4] M. Schwander and F. Vollertsen: In situ doping of diamond coatings with silicon, aluminum and titanium through a modified laser-based CVD process. *Diam. Relat. Mater.* 41 (2014) 41–48
- [5] W. Z. Lu et al.: Study on EDM Polishing of CVD Diamond Films. *Key Eng. Mater.* 315–316, (2006) 464–468
- [6] R. H. Olsen, R. C. Dewes, and D. K. Aspinwall: Machining of electrically conductive CVD diamond tool blanks using EDM. *J. Mater. Process. Technol.* 149 (2004) 627–632
- [7] H. Zeidler: Schwingungsunterstützte Mikro-Funkenerosion. Dissertation, TU Chemnitz, (2001) 13
- [8] A. Schubert et al.: Microelectrical Discharge Machining: A Suitable Process for Machining Ceramics. *J. Ceram.* 2015 (2015) 1–9
- [9] M. Prieske and F. Vollertsen: In situ incorporation of silicon into a CVD diamond layer deposited under atmospheric conditions. *Diam. Relat. Mater.* 65 (2016) 47–52
- [10] Keyence Corporation (Hrsg.): Einführung zur Rauheitsmessung von Oberflächen: Flächenrauheit. (2014) 1–18
- [11] H. Czichos and K.-H. Habig: Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. Springer-Verlag (2010)
- [12] A.C. Ferrari, J. Robertson: Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon, *Physical Review B* 61 (2000) 14095–14107